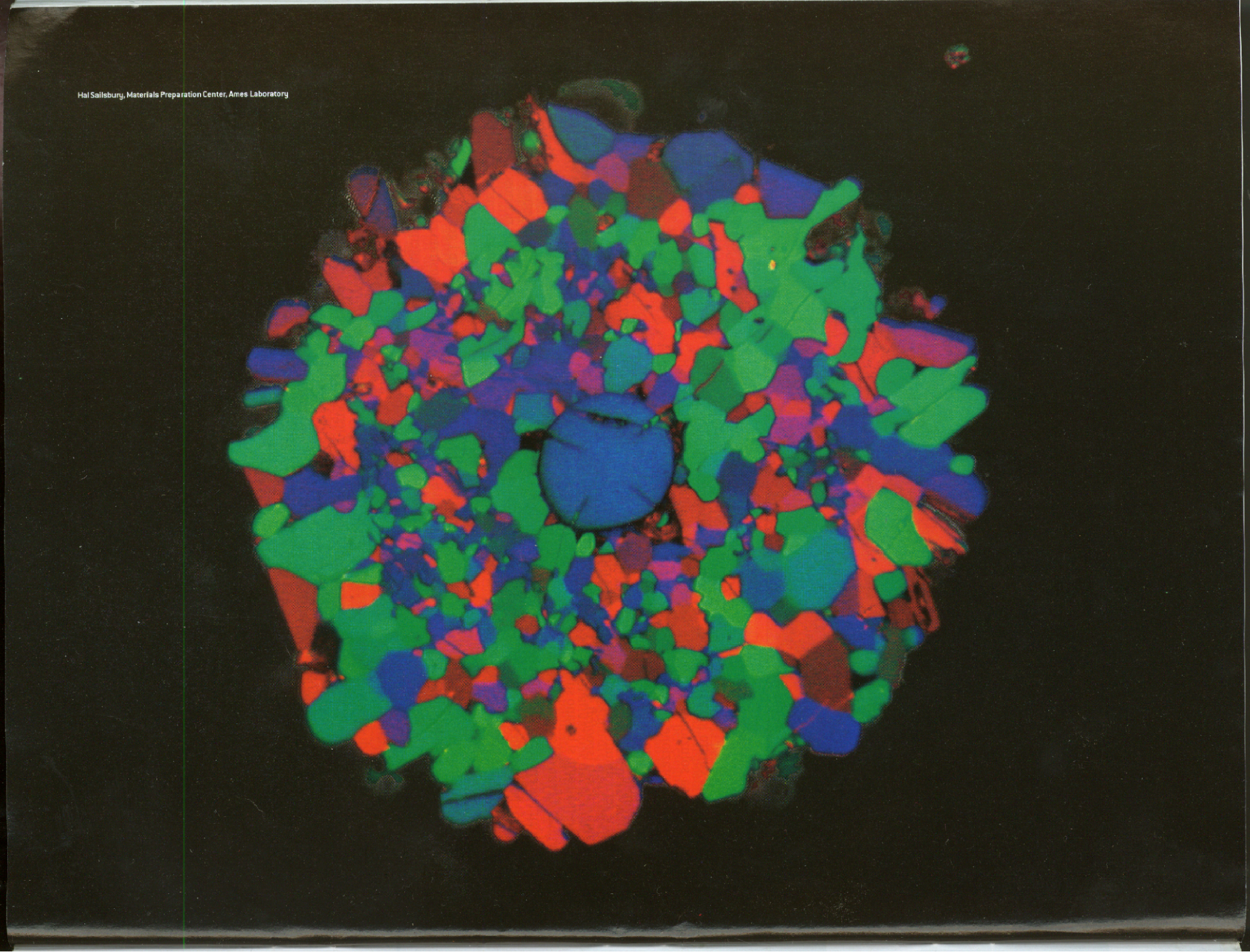


Hal Sailsbury, Materials Preparation Center, Ames Laboratory

LA PRIMAVERA DEI SUPERCONDUTTORI

Fino a pochi anni fa i fisici pensavano che i superconduttori ordinari non potessero superare temperature critiche piuttosto basse. Ma oggi un nuovo composto straccia il primato precedente e si candida per un futuro di importanti applicazioni

di Paul C. Canfield e Sergey L. Bud'ko

FILI COMPATTI. Una sezione lucidata di un filo di diboruro di magnesio mostra che il filo è essenzialmente denso al 100 per cento ed è costituito da piccoli grani non orientati che riflettono la luce in modo diverso, dando origine a vari colori. Questi fili sono utili per la ricerca di base sulla superconduttività del materiale. Il filo ha un diametro di 0,14 millimetri.

Immaginatevi di camminare nel vostro giardino e scoprire improvvisamente una vena d'oro in un angolo che pensavate di conoscere bene, e dove – fino al giorno prima – vi pareva che non ci fosse davvero nulla di interessante. Una simile sensazione di eccitazione si sparse nella comunità dei fisici dello stato solido nelle prime settimane del 2001, quando alcuni ricercatori annunciarono che il diboruro di magnesio (MgB_2) è superconduttore – vale a dire conduce corrente elettrica senza resistenza – a temperature prossime ai 40 kelvin. Questo semplice composto era stato studiato fin dagli anni cinquanta, e per decenni lo si era trovato sugli scaffali dei laboratori per gli scopi più disparati senza che nessuno sospettasse il suo prezioso talento nascosto. Sebbene 40 kelvin (cioè –233 gradi Celsius) possano sembrare una temperatura piuttosto bassa, era quasi il doppio del precedente record per un composto a base di metalli (circa 23 kelvin per le leghe di niobio, che sono largamente usate nella ricerca e nell'industria). Una temperatura di transizione così alta, peraltro, può essere raggiunta con tecnologie molto meno costose di quelle necessarie per ottenere superconduttività nelle leghe di niobio. Le applicazioni possibili vanno dai magneti superconduttori alle linee elettriche.

A differenza dei superconduttori ad alta temperatura (materiali a base di ossido di rame, che superconducono a temperature fino a 130 kelvin), MgB_2 sembra essere un superconduttore tradizionale, anche se di un nuovo tipo. Nella loro lunga ricerca di superconduttori con temperature di transizione sempre più alte, i fisici hanno sviluppato regole di massima sulle combinazioni di elementi che era opportuno testare. Molti sospettavano che i 23 kelvin delle leghe di niobio fossero vicini alla massima temperatura di transizione per un superconduttore tradizionale. E invece MgB_2 ha infranto le regole, spostando la barriera verso temperature più alte.

La velocità con cui è cresciuta la comprensione di MgB_2 è incredibile. Jun Akimitsu, della Aoyama Gakuin University di Tokyo, annunciò la scoperta a un congresso a metà del gennaio 2001. Appena due mesi dopo, a marzo, durante il congresso annuale della American Physical Society, furono presentati circa 100 interventi di due minuti ciascuno sull'argomento, mentre più di 70 articoli di ricerca erano stati inviati elettronicamente all'archivio di preprint arxiv.org. Questa esplosione di attività avvenne per due ragioni. Prima di tutto, una volta che si è capito come, è piuttosto facile produrre MgB_2 relativamente puro. In secondo luogo, nel 2001 la comunità dei fisici della materia condensata era interconnessa attraverso Internet come mai prima di allora. Questi due ingredienti, combinati con la promessa di un superconduttore nuovo e semplice, con un'elevata temperatura di transizione, formarono una miscela intellettuale esplosiva.

Confermare la scoperta

All'inizio, la notizia della scoperta si diffuse soprattutto via e-mail. Non era disponibile alcun articolo di ricerca o bozza elettronica in materia. Quando venimmo a saperlo, pochi giorni dopo il congresso, ci facemmo una serie di domande: possiamo produrre diboruro di magnesio solido e molto puro? (Normalmente, MgB_2 è una polvere piuttosto piena di impurità.) È davvero superconduttore a temperature vicine ai 40 kelvin? (Venivamo da vent'anni di USO, cioè «oggetti superconduttori non identificati», composti per cui venivano annunciate temperature di transizione esageratamente alte, che regolarmente non si riuscivano a riprodurre.) Se MgB_2 è davvero superconduttore, possiamo scoprire il meccanismo di questa superconduttività? E, infine, possiamo delineare alcune delle proprietà di base di questo composto? Per nostra fortuna, tutte queste domande avevano una risposta affermativa.

Le voci della scoperta di Akimitsu diedero inizio a un periodo frenetico e meraviglioso, per noi e per altri gruppi di ricerca. Il nostro gruppo è specializzato nello studio delle proprietà fisiche dei composti metallici, perciò non appena sentimmo della sua relazione al congresso ci sbarazzammo di tutti gli esperimenti già in corso e iniziammo a tentare di produrre MgB_2.

All'inizio ottenere il composto era piuttosto difficile. Il diboruro di magnesio è un composto intermetallico, ovvero una sostanza costituita da due o più elementi metallici. Il metodo più semplice per ottenere questi composti – semplicemente fondendo insieme gli elementi – era impraticabile, perché boro e magnesio hanno punti di fusione molto diversi: 650 gradi per il magnesio e oltre 2000 per il boro. Poiché bolle a poco più di 1100 gradi, il magnesio evaporerebbe prima che si possa formare il composto.

Ma l'evaporazione del magnesio ci suggerì un metodo alternativo: potevamo sigillare un frammento di magnesio e un po' di polvere di boro in un contenitore di tantalio, che è inerte, e portare il tutto a una temperatura abbastanza alta da far fondere, ma non bollire, il magnesio (intorno ai 950 gradi, per esempio). Il magnesio ha una tensione di vapore relativamente alta; a 950 gradi circa un terzo di atmosfera di vapori di magnesio è in equilibrio con il metallo liquido. Ci aspettavamo che questo denso vapore si sarebbe diffuso nel bo-ro metallico, producendo palline di MgB_2. E infatti in appena due ore questo processo produceva MgB_2 molto puro sotto forma di palline leggermente sinterizzate (un materiale simile all'arenaria). A tre giorni da quando avevamo appreso la notizia, avevamo prodotto il composto e potevamo confermarne la superconduttività a quasi 40 kelvin.

Avendo scoperto come produrre MgB_2 e avendo confermato che è un superconduttore, passammo alla domanda successiva: era un superconduttore di vecchio tipo, la cui attività può essere spiegata con una teoria assodata come il modello BCS (*si veda il box a p. 106*), o qualcosa di più esotico? Nel secondo caso saremmo stati davanti a una scoperta scientifica di profondo significato. Se invece si fosse trattato di un normale superconduttore BCS, allora bisognava spiegarne l'eccezionale temperatura di transizione, ma le prospettive di poterlo usare in applicazioni pratiche sarebbero state più incoraggianti.

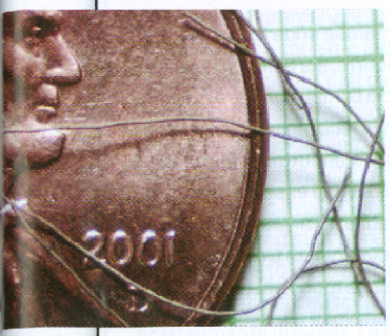
Per molte ragioni, alcuni ricercatori pensavano che MgB_2 non fosse un superconduttore BCS standard. Innanzitutto, prima che nel 1986 si scoprissero i superconduttori ad alta temperatura, le temperature di transizione più alte erano ferme attorno a 20 kelvin da vent'anni. Questo fatto aveva portato alcuni teorici a suggerire che nei composti che obbedivano alle regole della teoria BCS la temperatura di transizione più alta possibile fosse di circa 30 kelvin. I superconduttori ad alta temperatura a base di ossidi di rame eccedevano di gran lunga questo limite, ma non si pensava che fossero superconduttori BCS.

In secondo luogo, la temperatura di transizione, o temperatura critica (T_c), relativamente alta di MgB_2 violava una dalle vecchie regole empiriche della ricerca di composti intermetallici che avessero una T_c più alta: più sono gli elettroni che possono partecipare alla transizione di fase verso lo stato superconduttore, più alta è la temperatura di transizione. Né il magnesio né il boro potevano cedere a MgB_2 un numero di elettroni particolarmente alto.

Ma c'è una verifica sperimentale molto diretta per dire se un superconduttore segue la teoria BCS. Nella teoria svolgono un ruolo chiave le vibrazioni del reticolo

Si trattava di un superconduttore standard o eravamo davanti a qualcosa di più esotico?

FARE FILI



Norman E. Anderson, Jr.

I FILI sono stati ottenuti facendo reagire vapori di magnesio e filamenti di boro.

Hal Salisbury, Materials Preparation Center, Ames Laboratory

LA SEZIONE di un filo di diboruro di magnesio rivela un nucleo centrale di boruro di tungsteno del diametro di 0,015 millimetri.

Entro un paio di settimane dall'annuncio della superconduttività di MgB_2, avevamo ideato una tecnica per produrre fili di questo notevole superconduttore. Il diboruro di magnesio si può ottenere facendo reagire i vapori di magnesio con il boro, un processo che avviene in poche ore a temperature vicine ai 1000 gradi Celsius: il boro, in sostanza, aspira il vapore di magnesio dall'ambiente e diventa MgB_2 (gonfiandosi notevolmente nel processo). Questo processo funziona bene con le fibre di boro, che si trovano in commercio anche in lunghezze di centinaia di metri, ed è stato applicato a fili con diametri da 0,1 a 0,3 millimetri.

Questi spezzoni di filo permettono di misurare le proprietà fisiche intrinseche del MgB_2. Prima di poterli usare in applicazioni pratiche, però, dovranno avere una guaina conduttrice malleabile, che può trasportare la corrente se vengono meno le condizioni perché si abbia superconduttività, impedendo un riscaldamento catastrofico del MgB_2. Purtroppo non è ancora stata sviluppata una guaina adatta.

Una tecnica più comune per produrre i tubi consiste nel mettere polvere di boro e magnesio, o di diboruro di magnesio, in un tubo, e stirarlo fino a farlo diventare un filo, per poi ottenere una struttura solida con l'annealing. Questa tecnica ha prodotto campioni sperimentali lunghi da decine a centinaia di metri. Nonostante MgB_2 sia un superconduttore di recente scoperta, molte aziende sono già al lavoro per metterlo in commercio. Tra queste si annoverano la Diboride Conductors e la Hyper Tech Research, piccole imprese che stanno cercando di produrre fili di MgB_2 e migliorarne le proprietà, e la Specialty Materials, un'azienda più grande che si occupa di materiali e ha esperienza nella produzione di fili di boro.

In sintesi/*Qualità insospettate*

- Nel 2001 un gruppo di ricerca giapponese scoprì che il diboruro di magnesio, un composto apparentemente privo di caratteristiche degne di nota, diventa superconduttore a circa 40 kelvin, una temperatura critica doppia rispetto a materiali simili. La sua temperatura utile per le applicazioni è tra i 20 e i 30 kelvin.
- Queste temperature possono essere raggiunte con un raffreddamento a base di idrogeno liquido o neon liquido oppure mediante refrigerazione a ciclo chiuso, tecniche molto più economiche e più semplici del raffreddamento a base di elio liquido necessario per raggiungere i circa 4 kelvin a cui funzionano le leghe di niobio, che sono comunemente usate in ambito industriale.
- Quando viene drogato con carbonio o altre impurità, il diboruro di magnesio ha prestazioni uguali o addirittura superiori alle leghe di niobio nel mantenere la sua superconduttività in presenza di campi magnetici o quando trasporta una corrente elettrica. La potenziali applicazioni di questo composto comprendono magneti superconduttori, linee elettriche di potenza e sensibili rivelatori di campo magnetico.

cristallino del materiale. Immaginate che i pesanti ioni positivi del reticolo siano tenuti al loro posto da forti molle (i legami chimici). Le eccitazioni, come il calore, si manifestano come vibrazioni di singoli ioni a frequenze caratteristiche. La teoria BCS prevede che la temperatura di transizione di un superconduttore sia proporzionale alla frequenza delle vibrazioni del suo reticolo. Gli oggetti fatti di materiali di massa inferiore hanno frequenze caratteristiche più alte rispetto a oggetti identici ma costituiti da materiali di massa maggiore. Usando diversi isotopi di magnesio o di boro possiamo produrre MgB_2 con atomi di massa diversa, che influenzano la frequenza di vibrazione del reticolo, che a sua volta altera T_c in un modo caratteristico.

Il boro ha due isotopi stabili naturali, il boro 10 e il boro 11. La più semplice previsione del modello BCS è che T_c dovrebbe differire di 0,85 kelvin per i due campioni di MgB_2 fatti con l'uno o con l'altro isotopo. Con i nostri primi campioni, abbiamo registrato uno spostamento di un kelvin. Il fatto che la differenza sia leggermente più grande del previsto può essere spiegato dalla teoria BCS: indica che per la superconduttività le vibrazioni del boro sono più importanti di quelle del magnesio.

La vicinanza del nostro risultato al valore previsto di 0,85 kelvin rivelò che probabilmente MgB_2 è un superconduttore BCS, anche se estremo, con una temperatura di transizione molto più alta di ogni altro. Evidentemente le previsioni teoriche di un limite superiore di 30 kelvin per la superconduttività BCS non erano valide. E questa era una buona notizia, perché i superconduttori metallici BCS standard sono molto più semplici da lavorare e vi si possono produrre fili molto più facilmente che con i superconduttori a base di ossido di rame. In verità, ci accorgemmo improvvisamente che potevamo produrre fili di MgB_2 semplicemente esponendo filamenti di boro ai vapori di magnesio. Per molte misure, e per applicazioni pratiche come la produzione di magneti, i fili sono molto più utili delle palline sinterizzate.

Ma a che serve?

La superconduttività si manifesta solo a temperature molto basse, ma può avere parecchie applicazioni. Una delle più ovvie deriva dalla capacità dei supercon-

BREVE STORIA DELLA SUPERCONDUTTIVITÀ

Heike Kamerlingh Onnes scoprì la superconduttività nel 1911, quando utilizzò l'elio liquido come refrigerante per studiare le proprietà elettriche dei metalli a bassa temperatura. Con grande sorpresa di tutti, quando fu raffreddato a circa 4,2 kelvin, il mercurio perse improvvisamente la sua resistenza elettrica. Questa soglia è nota come temperatura critica, o T_c.

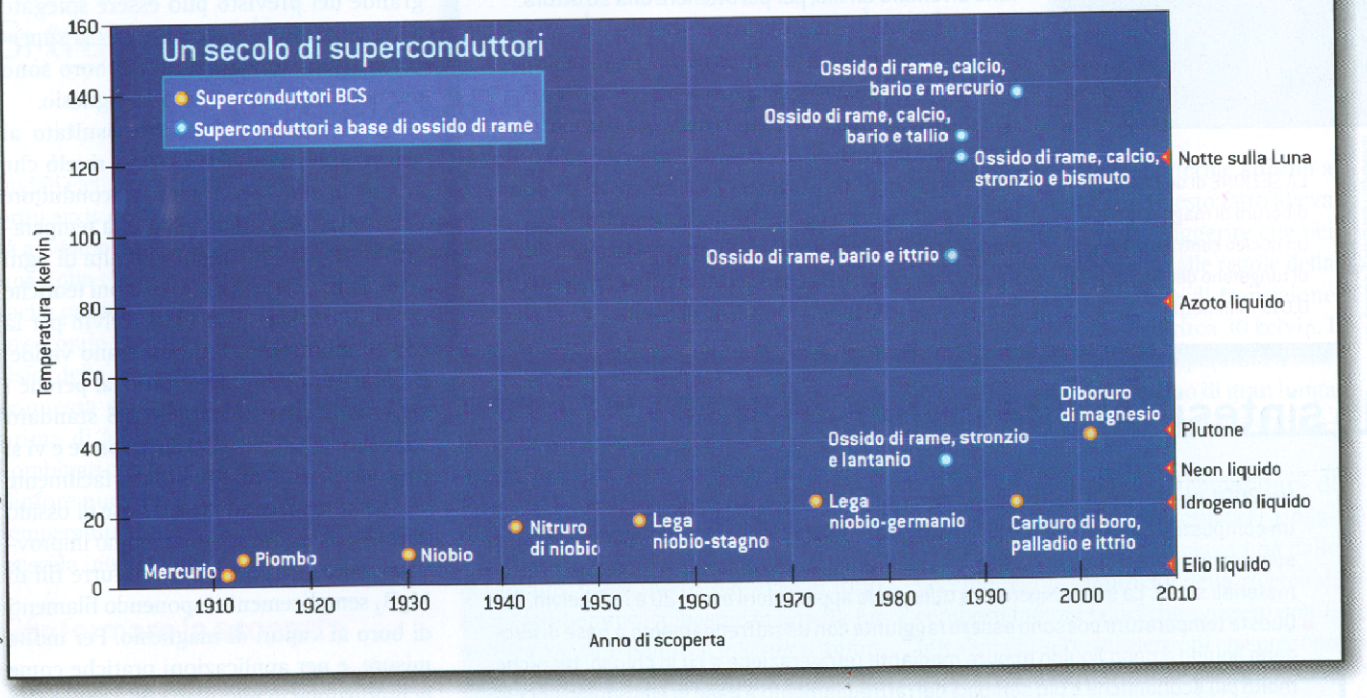
Nei primi cinquant'anni di ricerca sulla superconduttività, furono via via scoperti materiali con temperature critiche sempre più elevate. Tutti questi superconduttori erano o metalli puri o composti intermetallici (fatti di due o più elementi metallici). Ma dagli anni sessanta fino a metà degli anni ottanta il valore massimo di T_c sembrava non poter superare i 20 kelvin, o poco più.

Le cose cambiarono nel 1986, con la scoperta della superconduttività ad alta temperatura in un grande numero di composti a base di ossido di rame. Negli anni che seguirono, i valori della temperatura critica sono decollati, con l'ossido di mercurio-bario-calcio-rame che ha una T_c di circa 130 kelvin. È stato un periodo molto stimolante per la ricerca in questo settore, ma presto fu chiaro che la teoria della superconduttività più accreditata – la teoria BCS – non può spiegare l'assenza di resistenza in questi materiali. Nonostante quasi vent'anni di sforzi, non c'è ancora una teoria definitiva che spieghi come e perché i composti di ossido di rame siano superconduttori.

Questi composti pongono anche numerose sfide tecniche. Inizialmente erano molto difficili da produrre, sia nella forma ad alta purezza sia come monocristalli, e ciò complicava la misurazione delle loro proprietà fondamentali. Inoltre, la sintesi dei fili non era semplice: a differenza dei superconduttori intermetallici, i singoli grani che formano questi ossidi devono essere allineati gli uni con gli altri affinché il filo sia utilizzabile a fini pratici. Questi problemi hanno fatto sperare a fisici e ingegneri di trovare una sostanza con proprietà materiali in qualche modo più facili dei superconduttori intermetallici, e che a loro volta avessero una temperatura critica significativamente più alta di 20 kelvin.

All'alba del nuovo millennio, lo stato superconduttore poteva essere ottenuto con vari gradi di facilità e di spesa. Negli ossidi, la superconduttività era utilizzabile vicino ai 77 kelvin, che possono essere raggiunti piuttosto facilmente immergendo il materiale in azoto liquido. I composti intermetallici più vecchi, come la lega niobio-stagno – che funzionavano a temperature vicine ai 4 kelvin, raggiungibili con l'elio liquido – venivano usati nei laboratori e in applicazioni di interesse medico.

La scoperta del 2001 che il semplice composto intermetallico diboruro di magnesio superconduce a 40 kelvin, circa il doppio della temperatura degli altri composti intermetallici, era quasi esattamente quello che si sperava.



Tommy Moorman and Carli Morgenstein

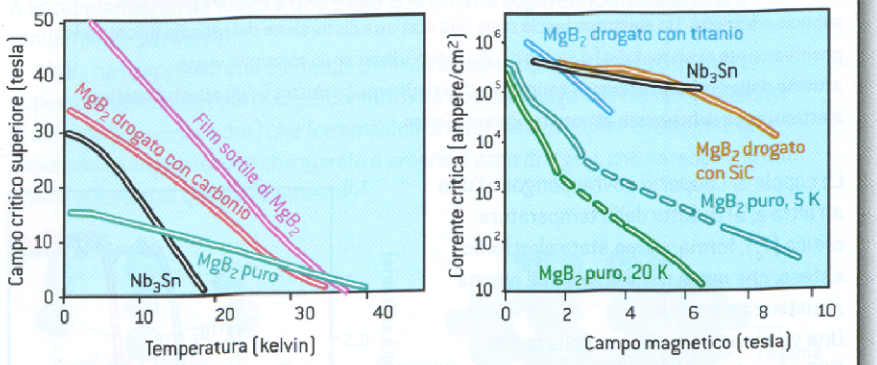
duttori di trasportare grandi correnti elettriche senza perdere energia per il riscaldamento dovuto alla resistenza. I magneti superconduttori possono produrre campi magnetici di oltre 20 tesla, sono usati nei laboratori e nelle apparecchiature per la risonanza magnetica e hanno un mercato in continua crescita.

Un'altra applicazione che è stata proposta sono le linee elettriche di distribuzione senza dispersione, che possono trasportare densità di corrente molto più elevate di quelle non superconduttrici. A oggi, i ricercatori hanno sperimentato con successo diversi prototipi a base di ossido di rame, che sono stati raffreddati fino a temperature prossime ai 70 kelvin in azoto liquido.

In generale, per comportarsi da superconduttori in applicazioni pratiche, i composti devono essere raffreddati ben al di sotto della loro temperatura critica, perché altrimenti grandi correnti elettriche o intensi campi elettrici farebbero perdere la

MIGLIORARE LE PRESTAZIONI

Riuscire a mantenere la superconduttività quando il materiale sta trasportando un'intensa corrente elettrica e in presenza di un campo magnetico è fondamentale per le applicazioni. I dati dei grafici mostrano come, drogando il diboruro di magnesio con impurità, siano migliorate le sue prestazioni, che ora eguagliano o superano quelle della lega niobio-stagno, il superconduttore preferito dall'industria (Nb_3Sn). Il grafico a sinistra mostra che gli spezzoni di filo di MgB_2 drogati con il carbonio e un film sottile di MgB_2 con un livello di impurità ignoto sopportano un campo magnetico più intenso («campo critico superiore») di Nb_3Sn a tutte le temperature. I dati a destra (presi a 4 kelvin eccetto dove specificato) mostrano che MgB_2 drogato con carburo di silicio (SiC) eguaglia la capacità di trasportare la corrente di Nb_3Sn, ma altre varianti sono notevolmente inferiori. Le linee tratteggiate sono interpolazioni.



Lucy Reading-Ikkanda

GLI AUTORI

PAUL C. CANFIELD e SERGEY L. BUD'KO lavorano entrambi allo Ames Laboratory del Department of Energy statunitense, in Iowa. Canfield è anche professore di fisica e astronomia alla Iowa State University. La sua ricerca si concentra sulla progettazione, la scoperta, la crescita e la caratterizzazione di materiali e fenomeni nuovi, principalmente dedicandosi agli stati elettronici e magnetici dei composti metallici alle basse temperature. Gli interessi di ricerca di Bud'ko comprendono la termodinamica e le proprietà di trasporto elettrico e magnetico dei nuovi materiali, le oscillazioni quantistiche nei metalli e nei semimetalli e le proprietà fisiche dei materiali in condizioni estreme che combinano alta pressione, intensi campi magnetici e basse temperature. Gli autori desiderano riconoscere la loro fruttuosa collaborazione con R. Wilke, D. Finnemore, C. Petrovic, G. Lapertot, R. Ribeiro e N. Anderson. Il loro lavoro ha avuto il supporto del direttore per la ricerca energetica dell'Office of Basic Energy Sciences.

superconduttività al materiale. Una temperatura critica di 20 kelvin, perciò, corrisponde a una temperatura operativa di 10; il che significa che il superconduttore deve essere raffreddato con elio liquido, un'operazione costosa e complicata.

La comunità che si occupa di ricerca applicata è interessata a MgB_2 perché questo materiale può essere raffreddato a temperature operative accettabili molto più facilmente delle leghe a base di niobio e degli altri composti che vengono usati oggi. Il diboruro di magnesio può essere raffreddato a buon mercato usando idrogeno o neon liquido, o mediante raffreddamento a circuito chiuso, tecniche che possono raggiungere rapidamente temperature inferiori ai 20 kelvin.

Ma perché questa speranza diventi realtà è necessario che MgB_2 abbia buone proprietà di superconduttore. I ricercatori stanno prestando particolare attenzione alle fasi miste del superconduttore, in cui un campo magnetico altera parzialmente la superconduttività: nella maggior parte delle applicazioni concrete, il materiale si troverà in questa fase. Campi magnetici deboli non producono lo stato misto; il materiale esclude il campo e rimane superconduttore. Per campi intermedi, invece, il materiale permette al campo magnetico di penetrare sotto forma di piccoli tubi di flusso magnetico, chiamati vortici. L'interno di questi tubi non è superconduttore, ma all'esterno di essi il materiale continua a condurre elettricità senza offrire resistenza. Questa fase mista manifesta ancora molte delle caratteristiche utili della superconduttività. Quando la forza del campo applicato cresce, aumenta la percentuale di materiale occupato dai tubi di flusso, fino a quando i tubi si sovrappongono completamente: a quel punto il materiale non è più superconduttore. L'intensità del campo a cui si perde la superconduttività viene chiamata campo critico superiore ed è una proprietà chiave che determina quanto un superconduttore sarà utile in pratica.

La maggior parte delle applicazioni implicherà la presenza di campi intermedi (il campo è abbastanza forte da essere utile ma non è tale da distruggere la superconduttività), così l'obiettivo diventa massimizzare l'intervallo di temperature e campi magnetici in cui sopravvive la fase mista superconduttrice. Anche la temperatura ha un ruolo in queste considerazioni, perché il campo critico superiore di un superconduttore varia con essa. Appena sotto T_c, il campo critico superiore è prossimo a zero, cioè anche il più debole campo magnetico distrugge la superconduttività. A temperature più basse la superconduttività può sopravvivere a campi più intensi.

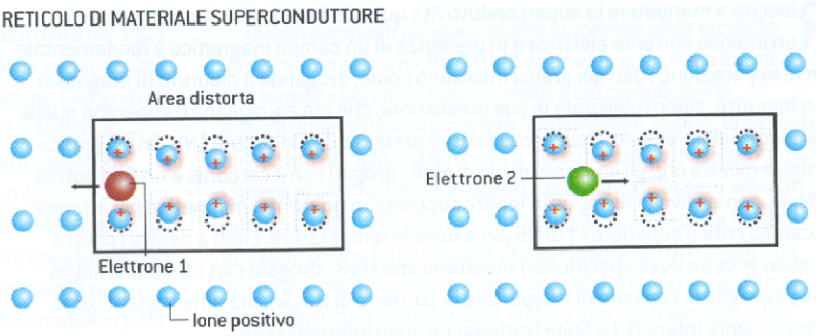
Fortunatamente, il campo critico superiore di un materiale può essere regolato producendo il composto in modi diversi, di solito aggiungendo impurità. Per esempio, quando un po' di boro viene sostituito con carbonio, il campo critico migliora notevolmente. Il nostro e altri gruppi hanno dimostrato che sostituendo il cinque per cento del boro con carbonio il campo critico può essere più che raddoppiato.

Il gruppo di David C. Larbalestrier, dell'Università del Wisconsin a Madison, ha invece mostrato che i film sottili di MgB_2 hanno valori ancora più alti di campo critico superiore, ben al di sopra di quelli della lega niobio-stagno (Nb_3Sn). I dati dei film sottili sono un mistero: da che cosa hanno origine gli alti valori di campo critico? Dipendono da piccole quantità di ossigeno? O c'è qualche altro elemento che si infila nella lega drogandola in modi sconosciuti? C'è una tensione nella struttura di MgB_2? Quali che siano le risposte a queste doman-

LA TEORIA BCS

Una delle domande chiave a proposito della superconduttività è: perché avviene? Vale a dire, quale meccanismo o interazione provoca la transizione in questo nuovo stato? Nel 1957 i fisici John Bardeen, Leon N. Cooper e J. Robert Schrieffer proposero una spiegazione del meccanismo alla base della superconduttività dei metalli in una teoria che porta le loro iniziali. In un metallo normale, non superconduttore, gli elettroni vengono diffusi dai difetti e dalle imperfezioni, generando la resistenza. Secondo la teoria BCS, la superconduttività avviene quando gli elettroni agiscono invece come un'unica entità collettiva che si può muovere senza dispersione.

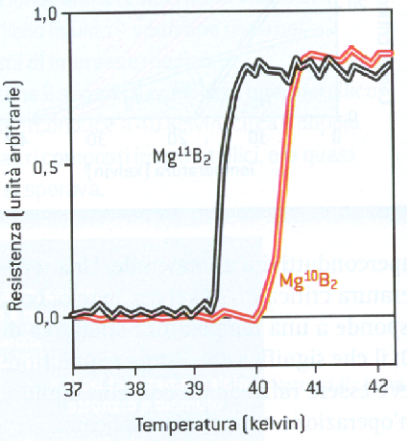
I blocchi di costruzione di questo nuovo stato elettronico sono coppie di elettroni, le coppie di Cooper, i cui partner sono debolmente attratti l'uno con l'altro. Questa attrazione tra particelle della stessa carica elettrica, impossibile per le leggi dell'elettrostatica classiche, si ha perché il metallo è composto di ioni positivi, oltre che di elettroni. Quando un membro della coppia si muove attraverso il metallo, lascia nella sua scia una distorsione ionica carica positivamente. Questa temporanea carica positiva netta attrae un secondo elettrone. In questo modo, la distorsione del reticolo accoppia debolmente gli elettroni. (Più precisamente, sono coinvolte nell'accoppiamento le vibrazioni del reticolo di una specifica frequenza.) Un'analogia è quella di due persone che saltano su un materasso elastico. Anche se non c'è attrazione diretta fra le due persone, esse tendono a rimbalzare l'una verso l'altra per via della distorsione che si produce nel tappeto sotto i loro piedi.



È LA FORMAZIONE DI COPPIE DI ELETTRONI, chiamate coppie di Cooper, che porta alla superconduttività. Un elettrone lascia nella sua scia una distorsione del reticolo di ioni carichi positivamente di un metallo (*a sinistra*). Poco dopo, il secondo elettrone viene attratto dalla concentrazione di carica positiva risultante (*a destra*). Agli effetti pratici, gli elettroni sono debolmente attratti l'uno verso l'altro.

Le coppie di Cooper si sovrappongono l'una all'altra e, al di sotto della temperatura critica (T_c), formano uno stato elettronico esteso, che non è più soggetto ad alcuna resistenza elettrica.

Una versione semplificata della teoria BCS prevede che T_c dipenda da tre proprietà del materiale: il numero di elettroni che possono partecipare allo stato superconduttore (più è alto il numero e più alta è T_c); le frequenze caratteristiche del reticolo coinvolte nell'accoppiare gli elettroni nelle coppie di Cooper (maggiore la frequenza, più alta T_c); e la forza dell'accoppiamento tra le distorsioni del reticolo e gli elettroni (più forte è l'accoppiamento e più alta è T_c). Per decenni, la ricerca di valori più alti di T_c si è concentrata sull'ottimizzazione di queste tre proprietà, con una preferenza per il tentativo di migliorare le prime due. MgB_2 sembra avere una T_c alta per il suo più forte accoppiamento reticolo-elettroni, la terza proprietà.



LA RESISTENZA ELETTRICA di MgB_2 scende a zero quando il materiale viene raffreddato sotto la sua temperatura critica, pari a circa 40 kelvin. La temperatura critica è diversa per campioni prodotti con boro 10 o boro 11 puri. Questo chiaro spostamento isotopico è previsto dalla teoria BCS, e indica quindi che la superconduttività di MgB_2 è spiegabile con questo modello.

Lucy Reading-Ikkanda

de, chiaramente MgB_2 è un materiale promettente per magneti superconduttori che possano funzionare a temperature più alte e possibilmente immersi in campi ancora più intensi di quelli sopportabili dalla lega niobio-stagno, che oggi è il materiale preferito per le applicazioni.

La seconda proprietà superconduttrice di particolare interesse per la fisica applicata è la densità critica di corrente. Questa grandezza indica la massima quantità di corrente che un superconduttore può trasportare continuando ad avere resistenza nulla. Per densità di corrente superiori a quella critica, i vortici iniziano a spostarsi. E una volta che iniziano a muoversi si hanno perdite di energia. Ciò significa che il materiale ha una resistenza elettrica. Per contrastare questo effetto, i vortici devono essere bloccati introducendo nel superconduttore le giuste impurità. Spesso questa operazione può essere perfezionata rendendo più piccoli i singoli cristalliti (o grani) del materiale, ovvero migliorando l'area della superficie associata con i confini dei grani, dove i vortici sono fissati. Un altro modo per migliorare il fissaggio dei vortici implica l'aggiunta di microscopiche inclusioni di qualche altro materiale.

Al momento, una delle maggiori sfide associate alla produzione di magneti superconduttori in MgB_2 è quella di migliorare la densità critica di corrente in presenza di

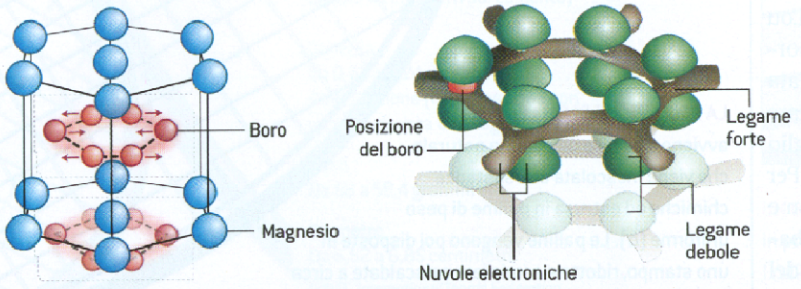
STRUTTURA E LEGAME

Una delle principali ragioni della temperatura di transizione sorprendentemente alta di MgB_2 è la forza dell'interazione tra certi elettroni e certe vibrazioni del reticolo. Un'interazione che si instaura per via della struttura e dei legami del materiale.

Gli atomi di boro di MgB_2 formano uno schema esagonale a nido d'ape (*in rosso, a sinistra*). Questi strati sono separati da strati di magnesio (*in blu*). Gli elettroni responsabili della conducibilità elettrica tradizionale, e anche della superconduttività, sono associati agli strati di boro e sono coinvolti in uno di due diversi tipi di legami nel materiale (*a destra*). Nel piano dell'esagono si ha un legame molto forte, mentre un legame più debole tiene insieme i diversi strati di boro.

Gli elettroni di conduzione dei legami planari sono fortemente influenzati dalle vibrazioni del reticolo nel piano (*freccia a destra*). Questa forte interazione, o accoppiamento, dà luogo a uno stato che rimane superconduttore anche a temperature più elevate.

MgB_2 ha riproposto una domanda di fisica di base molto interessante: può un superconduttore avere una superconduttività che coinvolga due collezioni distinte di elettroni (*in verde e oro*) che formino due diversi mari di coppie di Cooper? Gli esperimenti suggeriscono che questo è proprio il caso di MgB_2, che sarebbe il primo chiaro esempio di questo fenomeno.



Lucy Reading-Ikkanda

PER APPROFONDIRE

NAGAMATSU J. e altri, *Superconductivity at 39 K in Magnesium Diboride*, in «Nature», Vol. 410, pp. 63-64, 1° marzo 2001.

CANFIELD P.C. e BUD'KO S.L., *Magnesium Diboride: One Year On*, in «Physics World», Vol. 15, n. 1, pp. 29-34, gennaio 2002.

GRANT P.M., *Energy for the City of the Future*, in «Industrial Physicist», Vol. 8, n. 1, pp. 22-25, febbraio-marzo 2002. Disponibile su: www.aip.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-1/p22.pdf.

CANFIELD P.C. e CRABTREE G.W., *Magnesium Diboride: Better Late than Never*, in «Physics Today», Vol. 56, n. 3, pp. 34-40, marzo 2003.

KWOK W., CRABTREE G.W., BUD'KO S.L. e CANFIELD P.C. (*a cura*), *Superconductivity in MgB_2: Electrons, Phonons and Vortices*, in «Physica C», Vol. 385, n. 1-2, marzo 2003.

campi magnetici intensi. Questo parametro per MgB_2 puro è confrontabile con quello della lega niobio-stagno per piccoli campi magnetici, ma diminuisce molto più rapidamente all'aumentare della loro intensità. E questa non è una buona notizia. D'altra parte, nei quattro anni trascorsi dalla scoperta della superconduttività di questo composto, la comunità scientifica ha ottenuto notevoli miglioramenti della densità critica di corrente sia per i campi deboli sia per quelli intensi. E secondo coloro che si stanno dedicando a queste ricerche sono in vista altri miglioramenti.

Passato, presente e futuro

La scoperta della superconduttività di MgB_2 è al tempo stesso il frutto di decenni di ricerca mirata e un forte segnale che la natura non obbedisce sempre alle regole empiriche che elaboriamo nei nostri tentativi di descriverla. Sebbene si conoscesse l'esistenza di MgB_2 da mezzo secolo, non era mai stato messo alla prova per verificarne la superconduttività, anche perché non corrispondeva alla nostra idea di un potenziale superconduttore.

Negli ultimi quattro anni, la comprensione della superconduttività in questo composto si è evoluta rapidamente. Abbiamo un'idea chiara delle proprietà del materiale e stiamo imparando a modificarlo per migliorare l'intervallo di campi magnetici e di densità di corrente in cui può essere utilizzato. Le proprietà fra i 20 e i 30 kelvin sono migliorate drasticamente, tanto da far pensare che applicazioni come i magneti superconduttori possano funzionare raffreddandole con liquidi criogenici economici come l'idrogeno o il neon. Sono stati prodotti prototipi di cavi ricoperti e anche qualche magnete di prova, ma è necessario molto altro lavoro per ottimizzare le proprietà del superconduttore e per capire come si possano produrre materiali per ricoprire i cavi.

Nell'insieme, il futuro di MgB_2 sembra piuttosto roseo. In verità, se avverrà uno spostamento verso un'economia a base di idrogeno, allora MgB_2 potrebbe davvero imporsi. Se dovremo produrre grandi quantità di idrogeno, per esempio, in piccoli reattori a letto di ciottoli, allora dovremo anche trasportarlo in qualche modo. Un metodo potrebbe essere quello di trasportare l'idrogeno in forma liquida in tubi raffreddati sotto il suo punto di ebollizione, 20 kelvin. Questi stessi tubi potrebbero costituire il sistema criogenico per cavi di MgB_2 che condividano lo spazio all'interno dell'isolante termico. Oggi un simile sistema sembra più fantascienza che una realtà ingegneristica, ma è stato proposto per un serio studio di fattibilità.

Dopo la scoperta del primo superconduttore a base di ossido di rame, se ne sono scoperti molti altri. Invece a quattro anni dalla scoperta di MgB_2 non sono stati trovati altri composti simili. La scoperta della superconduttività negli ossidi era come la scoperta di un intero nuovo continente con vaste lande da esplorare. La scoperta della superconduttività di MgB_2, invece, sembra più simile alla scoperta di un'isola remota al largo di un arcipelago ben conosciuto. Chissà se è davvero l'ultimo elemento della catena, o se ci saranno ancora altre sorprese...